



TITLE:

クラスター模型の展開(1.原子核物理学の展開,学問の系譜-アインシュタインから湯川・朝永へ-)

AUTHOR(S):

大久保, 茂男

CITATION:

大久保, 茂男. クラスター模型の展開(1.原子核物理学の展開,学問の系譜-アインシュタインから湯川・朝永へ-). 物性研究 2006, 86(3): 280-293

ISSUE DATE:

2006-06-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/110521>

RIGHT:

クラスター模型の展開*1

大久保 茂男

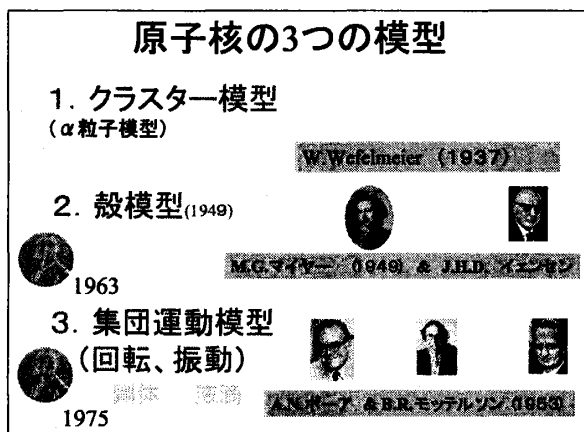
1 はじめに

世話人代表の坂東昌子さんからあたえられた「クラスター模型の展開」というタイトルでお話します。小林研の大先輩である池田清美先生が全体的なお話をされましたので、私は自分がクラスター模型研究で行ってきたことを中心に、論文などでは書けなかったことを含めて、なにがクラスター模型研究の基本課題であったか、その困難がどのように乗り越えられ解決されたのか、を中心にお話したいと思います。

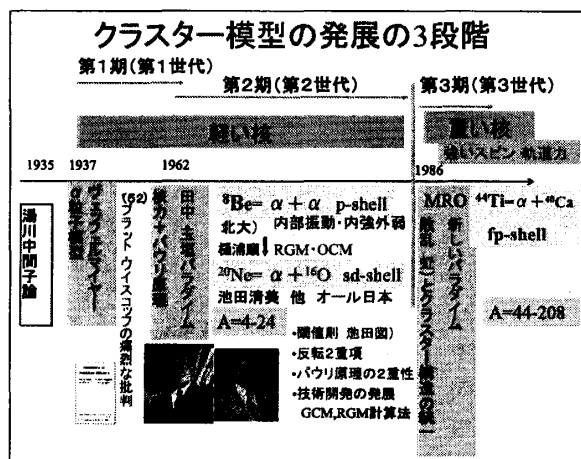


2 原子核の3つの模型

原子核の模型は3つあります (slide1)。1つはマイヤーとイェンセンによる殻模型で、原子核の全領域を説明する模型として認知され、1963年ノーベル賞を授与されています。2番目は集団運動模型で、ボーアとモッテルソンによりコペンハーゲンを中心に展開されました。振動と回転運動が原子核の広い領域で存在することを示し、1975年ノーベル賞をレイノウオーターとともに授与されています。



[Slide 1]



[Slide 2]

原子核のクラスター模型は、当初は α 粒子模型と呼ばれていました。これは殻模型や集団運動模型よりも10年以上早く、湯川先生による中間子論が提唱された2年後の1937年にヴェッフェルマイヤー[1]により提案されています。しかし、この模型はいまだにノーベル賞を授与されてないことからわかるように、他の2つの模型と違って長い間、原子核の全領域で通用する普遍的模型としては認知されませんでした。原子核全体に通用する模型であることが示されたのはごく最近のことです。これは原子核の系が原子や分子などと異なり、一粒子運動と集団運動とクラスター構造が同じエネルギー領域に共存するなど、強い相互作用独特の性質に関連していると思われます。

3 クラスター模型の発展の3段階

クラスター模型の発展は3つの段階に分けることができます (slide2)。第1期から第3期まで、あるいは第1世代から第3世代と呼ぶのがよいかもしれません。

第1期あるいは第1世代は1937年のヴェッフェルマイヤーによる α 粒子模型の提唱に始まります。それは原子核が α 粒子の集まりとして理解できるというたいへんナイーブな模型です。質量数が4の倍数である軽い原子核ではある程度成功しました。しかし、この模型は1952年ブラット・ワイスコフの教科書で激しい批判[2]を浴びました。1949年提唱された殻模型が原子核の全領域を説明するのに対し、 α 粒子模型は軽い領域でしか説明できないからとても一人前の模型とはいえないというわ

*1 「学問の系譜—アインシュタインから湯川・朝永まで—」(京都大学基礎物理学研究所, 11月7日—8日, 2005年)での講演原稿に補筆したものです。

けです。玉垣良三先生にかつてお伺いしたところでは、この批判は当時の研究者にとってはたいへんな衝撃であったようです。クラスター模型など原子核の研究ではないという感じで、 α 粒子模型はすたれ、主流は殻模型と集団運動模型にとって代わられました。

第2期あるいは第2世代は1962年の田中一先生・玉垣良三先生たちの α - α の研究で始まります[3]。このような逆境の中で北海道という当時は辺境の地で田中一先生がクラスター模型研究をはじめられたのはたいへん勇気のいることで、湯川中間子論・核力にベースをおく確固とした信念があったものと思われます。たいへん先駆的であり私は両先生をたいへん尊敬しています。

核力とパウリ原理に基づく微視的クラスター模型研究はその後の方法論的基礎を築いたものです。動力学的クラスター模型のパラダイムを示したといつてよいと思います。内部振動の発見など画期的な成果をあげ、その後の1960,70年代のクラスター研究の大きな流れを切り開きました。

1970年代、日本の多くの研究者が田中一先生、玉垣良三先生、樋浦順先生を中心とするクラスター研究の発祥の地である北大から九大まで、まさにオール・ジャパンの形でp殻、sd殻領域を中心とする軽い領域の原子核のクラスター模型研究につつまみましたが、これらは田中・玉垣の微視的・模型的クラスター研究のパラダイムの中で行われてきたといつても過言ではないと思います。

このなかで先ほどの池田先生のお話にもでてきました閼値側や池田図、反転2重項などの新しい考え方、また新しい計算技術などが日本から生み出されました。日本は理論的なクラスター研究において世界の中心であり、基礎物理学研究所は要でありました。これらの成果は1972年[4]と1980年[5]Progress of Theoretical Physicsのサプリメントとしてまとめられました。この期はクラスター研究の黄金期であり、第2期あるいは第2世代と呼ぶことができます。質量数24付近までの軽い核のクラスター構造が包括的に明らかにされ、クラスター模型はこの領域においては殻模型以上に成功をおさめることが示されました。

この成果をうけていろいろな人により質量数40以上のスピン-軌道力が強い、重い領域の核へクラスター模型を展開する研究が行われましたが成功しませんでした。重い領域はスピン-軌道力のためクラスター模型は軽い核のようにはいかないようだ、というのが1980年にまとめられたサプリメントの結論でした。池田先生のお話のタイトルは「始めから終わりまで」の繰り返し」というものでしたが、まさに1980年サプリメントを書き、終わりました。池田先生は軽い核のクラスター研究の成果をひっさげてハイパー核という荒野に向かわれました。

重い領域でもクラスター模型が成立するというのを、新たな視点、新たなパラダイムから示したのがわれわれの仕事です。1986年からクラスター研究の第3期または第3世代が始まったといえます[6]。1937年から1986年まで、50年間解けなかった重い領域の原子核でクラスター模型が成立するかどうかというもっとも基本的な課題が解かれることとなりました。

4 重い領域への展開と第2世代の問題・限界

重い領域でのクラスター模型の困難はいろいろな研究ででていました(slide 3)。ひとつは有馬朗人さんたちによるカルテット模型をもちいた研究で、 α 粒子ではなく4粒子相関を取り入れた模型です。フランスを中心に多くの理論的・実験的研究がされましたが最終的には成功しませんでした。第2は池田グループの ^{40}Ca の微視的クラスター模型による研究です。これもクラスター構造はこの領域では軽い核のように成立しないとの結論でした。第3は ^{44}Ti の研究です。この核は典型的なクラスター構造をもつ ^{20}Ne の類似核であり、fp殻領域における典型核として国内外の多くの研究者により微視的クラスター模型を中心にかかなり徹底的に研究されました。しかし、結論的にはうまくいかずそれらの研究のなかには論文

としては発表されないままになったものもありました。そんな中で1985年堀内和さんが微視的クラスター模型(RGM+WKB)による論文を発表しました。そして、 ^{44}Ti ではクラスター模型は基底状態を含めた構造を包括的に説明することはできないということを α - ^{40}Ca 間の光学模型ポテンシャルの

重い領域への展開と第2世代の問題・限界

- | | |
|--|--------------|
| 1. 質量数A=50領域 カルテット模型の不成功 | カルテット 有馬他 |
| 2. ^{40}Ca の構造: アナログ核 ^{16}O と異なる
→K=0バンド計算・実験ともに出ず | OCM 小川・鈴木・池田 |
| 3. ^{44}Ti の構造: アナログ核 ^{20}Ne と異なる→
基底バンド: パリティ2重項構成せず | RGM 堀内 |
| 4. $\alpha + \alpha$ のアナログ核:
$^{32}\text{S} = ^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ の構造への拡張の困難 | RGM 池田・東崎他 |
- 「スピン・軌道力が強くなり[4]対称性のbreakdownが起こる」(PTP Suppl. 68 (1980) p.182)

[Slide 3]

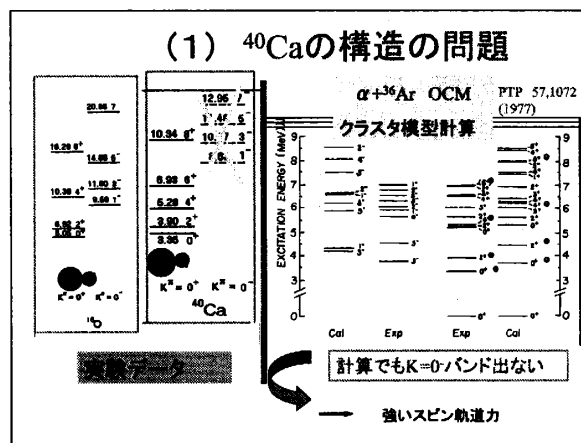
系統的分析から示しました。このように多くの研究はいずれも ^{44}Ti 付近の重い領域ではクラスター模型は困難であるという認識でした。

そのほかにも ^{32}S における $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$ クラスター構造など微視的模型による核力 + パウリ原理という方法論は重い領域においては困難に直面していました。1980 年のサブリメントの、重い領域では強いスピンの軌道力のためクラスター構造は軽い核のように成立しなく難しいのではないか、という悲観的結論は、クラスター研究をリードしてきた人々に共通した認識であったといえます。

第 1 世代の行き詰まりは「 α 粒子模型は重い領域ではうまくいかない」という、ブラット・ワイスコッフによる外部から、殻模型からの批判でした。これに対し、第 2 世代の行き詰まり、「終わり」、はクラスター研究を精力的に展開してきた当事者によるものでしたから重みがありました。なにが難しかったか代表例で説明します。

(1) ^{40}Ca の構造の問題

^{40}Ca には ^{16}O によく似てクラスター構造をもつ $K = 0^+$ バンドがあります (slide4). $\alpha + ^{36}\text{Ar}$ の微視的クラスター模型計算をすると、(1) $K = 0^+$ 回転バンドはきれいにでて、実験とよく合います。そして、 $\alpha + ^{36}\text{Ar}$ クラスター構造をもっています。(2) 計算結果はほかの状態も実験データをほぼ説明できます。しかし、大きな問題があります。 $K = 0^+$ バンドが $\alpha + ^{36}\text{Ar}$ というクラスター構造をもっていれば、パリティ 2 重項にあたる $K = 0^-$ という、負パリティのクラスターバンドが現れるべきですが、実験でも理論計算でもでないということです。したがって、 ^{40}Ca は類似核 ^{16}O とは違って、クラスター構造は崩れているのではないかとということです。池田さん達新潟グループの論文はこう結論しました。



[Slide 4]

(2) ^{44}Ti の構造の問題：苦悩の実験データ

次は ^{44}Ti の構造です (slide5). ^{44}Ti は励起エネルギー 8.54 MeV に α 粒子移行反応で強く励起される 0^+ 状態があり、11.7 MeV には同様に α クラスター状態 1^- があります。どちらも、ロチェスター・グループ、ミュンスター・グループのクラスター研究の大御所的な所での実験です。

この2つの $0^+, 1^-$ 状態は $\alpha + ^{40}\text{Ca}$ の構造をもつクラスター状態のバンド・ヘッドと考えて適切な有効 2 体力をとるとよく理解できます (見方 (1)).

ところがこの考えかたではもっとも低い状態が 8.54 MeV の 0^+ 状態であり、理論的にはこれより低いエネルギーに準位状態は存在できません。ところが、実験で見つかっている基底バンドはこれより低いエネルギーですから、基底バンドはどう理解したらいいのか困ったことになります。こうして、基底バンドはこの見方 (1) のクラスター模型では説明できません。

一方、基底回転バンドがクラスター構造をもつと仮定しても、適切に有効 2 体力をとるとエネルギー準位やガンマ線の遷移確率をよく説明できます (見方 (2)).

しかし、そうすると矛盾がおきます。計算では基底バンドの次に高いエネルギーに現れるバンドは負パリティです。実験で見つかっているのはプラス・パリティのバンドです。実験では負パリティ・バンドはその次、もっと高い励起エネルギーに現れます。クラスター模型でこれを同時にだすことは不可能です。

見方 (1) および見方 (2) のいずれにしても ^{44}Ti においてクラスター模型が実験データの基本的構造を矛盾なく説明することはできません。クラスター模型限界説は実験事実による根拠のある見解でした。

(3) 微視的クラスター模型

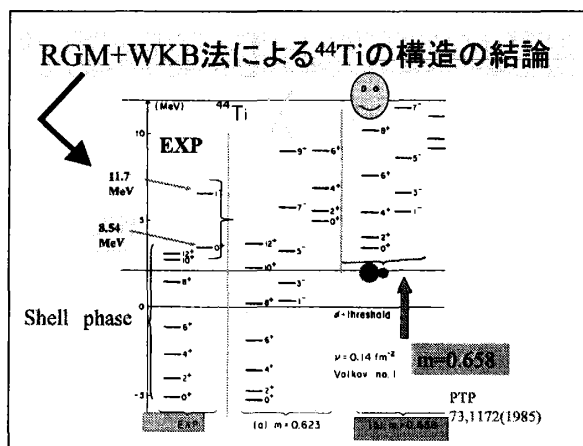
RGM+WKB による等価局所ポテンシャル計算で第 1 番目の見方 (見方 (1)) が合理的であることが堀内さんにより示されました。重陽子、 ^3He , α などの軽い粒子の ^{40}Ca からの散乱の系統的研究で、光学ポテンシャルの核子あたりの体積積分はゼロ・エネルギーでは約 350 MeV fm^3 くらいの大きさであることが実験データから知られています。一方、微視的クラスター模型 RGM で $\alpha - ^{40}\text{Ca}$ 間

の等価局所ポテンシャルを WKB 近似で計算すると, Volkov の有効 2 体力のパラメーターを $m=0.658$ とするとこの実験値とよく合います。

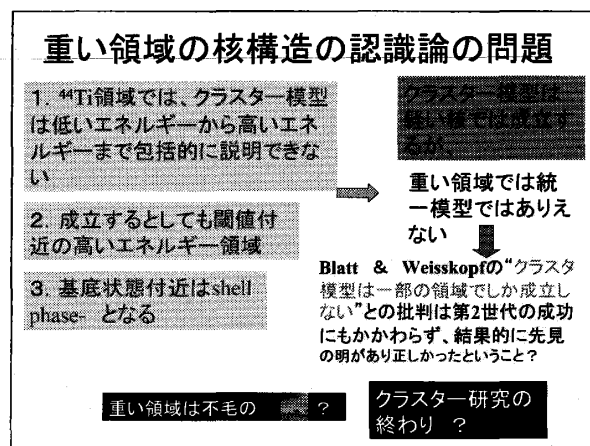
(4) RGM+WKB 理論から見る ^{44}Ti の構造の結論

この有効 2 体力をもちいた微視的クラスター模型 RGM による計算で, ^{44}Ti のクラスター状態のエネルギー準位は前述の (1) のような見方, つまり実験のクラスター状態 8.54 MeV の 0^+ バンド, 11.7 MeV の 1^- バンドがもっとも低いクラスターバンドであることが示されました。基底バンドはクラスター模型の範囲外でまったく記述の対象外となり, 基底バンドを説明しようとする, 別個に殻模型をもって説明しないといけなくなります。

後者の (2) の見方, すなわちクラスター模型でも基底バンドがでるとする見方は排除されることとなります。この論文ではそのような (2) の見方が一見実験データに合っているようにみえるのは表面的な見せかけであり, 基底状態を含めてのクラスター模型での記述が困難になるのは, ^{44}Ti 領域ではスピン-軌道力が強くなることによるであろうと論じられました。これは重要な結論に導きます。



[Slide 5]



[Slide 6]

(5) 重い領域の核構造の認識論の問題

整理するとこのようになります (slide 6)。

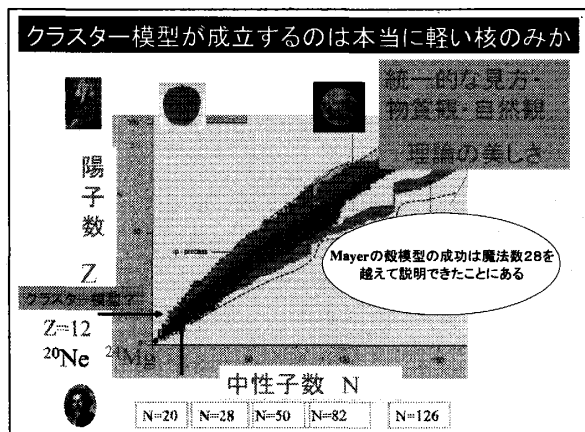
- (1) クラスター模型は閾値則の通り高い励起エネルギー付近では成立する。
- (2) しかし, 基底状態は強いスピン-軌道力により殻模型的構造をもつ。
- (3) したがって, クラスター模型は低いエネルギーから高いエネルギーまで包括的に記述できる統一模型ではない。

クラスター模型が成立するのは軽い核の領域のみで, 質量数 40 以上の重い核では包括的な模型としては成立しないということになります。結果的にブラット・ワイスコップの批判は正しく先見の明のある批判であるということになります。しかし, 広大な重い領域はクラスター研究にとって本当に「不毛の荒野」でしょうか?

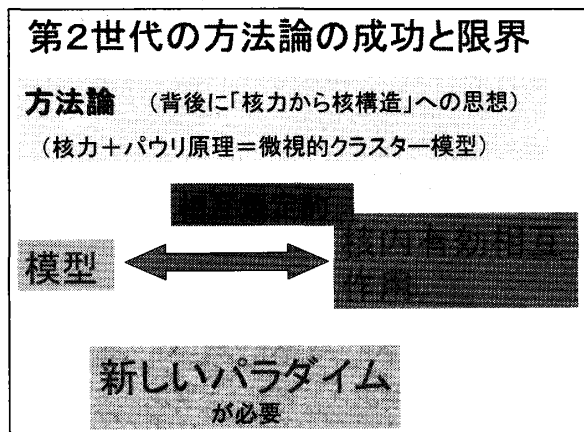
(6) クラスター模型が成立するのは本当に軽い核のみか

私はアイザック・ニュートンが好きです。ニュートンの万有引力の理論が広く受け入れられているのはリンゴが落ちると月が落ちないのを同時に説明できるからです。そこには自然に対する統一的な見方, 統一的な自然観があります。そして理論にも美しさがあります。マイヤーとイェンセンの殻模型も軽い核の領域の魔法数 2, 8, 20 だけでなく重い核の魔法数 28, 50, 82, 126 をスピン-軌道力という実体を現象論的に導入し統一的に説明しました。そこにも物質に対する統一的な見方・物質観があり, 理論の美しさがあります。クラスター模型は軽い核でたいへん成功し殻模型以上にいろいろな性質を説明することに成功しました。しかし, 軽い核は核図あるいは周期律表をみると原子核のほんの一部分です (slide 7)。原子核全体の 10 % ありません。クラスター模型が軽い核でしか成立しないのであれば殻模型や集団運動模型のように, 原子核の一般的な模型としては認められないでしょう。そして, なによりもそのようなクラスター模型には原子核を統一的に説明できるという「理論の美しさ」がありません。世に受け入れられる模型は統一的な見方, 物質観, 自然観をあたえるものでないといけません。ノーベル賞を授与されていないのもこのようなことと関係しているのではないかと思います。

れます。



[Slide 7]



[Slide 8]

(7) 核模型と有効相互作用の相互規定性と第2世代の方法論的限界

有効核力とパウリ原理による微視的模型による方法はクラスター模型が成立し有効相互相互がよくわかっている時、平時にはたいへん有効です。ただ、新しい未知の荒野の領域へ展開するときのように、模型が有効であるかどうか分からない時は、たまたま正しい有効相互作用をとれば成功する可能性もあるかもしれませんが、正しくない有効相互作用をもちいると間違った結論にいたる可能性があります。核模型と有効相互作用の相互規定性の重要性は私の師である永田忍さんがよく注意を喚起し強調されていました (slide8)。局面を突破するには有効相互作用に依存しないあるいはまったく新しいアプローチと新しいパラダイムが必要です。

5 新しいパラダイム：虹と ALAS とクラスター構造の統一

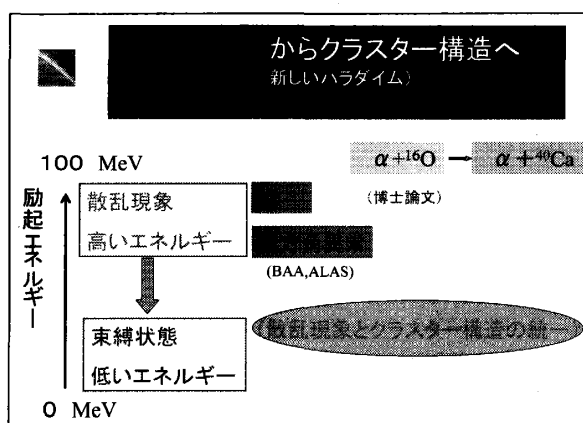
核力から核構造を明らかにするという第2世代の研究の視点・方法論は軽い核では成功しましたが、重い領域のクラスター構造研究については悲観的結論で終わりました。このような状況では腕力で研究をすすめてもうまくいきません。池田先生が「終わり」と宣言され、ハイパー核に転進・挑戦されたのは正しい選択であったかもしれません。

スピン-軌道力の強い ^{44}Ti 領域でクラスター構造が成立することはまったく新しい視点から示されました。

その視点は私の博士論文にすでにでています。1970年代には ^{44}Ti の問題を何度も試みたのですが突破できませんでした。やはり核力から核構造へという呪縛から逃れることができませんでした。京都の研究室で研究者として育った人にはとくに強くあると思われませんが、原子核を理解するには核力から出発して正統的にせめるべきであるという認識です。原子核の殻模型、集団運動模型が核力とは直接関係なく、むしろ現象論的な研究から提出されたのと対照的に日本で展開されたクラスター模型は最初から核力を意識して展開されてきました。広い意味では中間子論による核力を基礎にして核構造を理解するとの視点・戦略から北大のクラスター研究は始まり、その後の日本のクラスター研究はさきに述べたようにそのパラダイムのなかで第2世代が展開されてきました。

しかし、核力の方法論が第3領域で失敗したのと同じように、この核力から核構造という視点はクラスター構造研究においても限界があったと思います。

私は1985年イギリス・オックスフォード大学にいました。イギリスは原子核発見の地だけあって核構造研究、なかでもクラスター構造の研究が盛んでした。ティータイムにはいろいろな人が集まりお茶



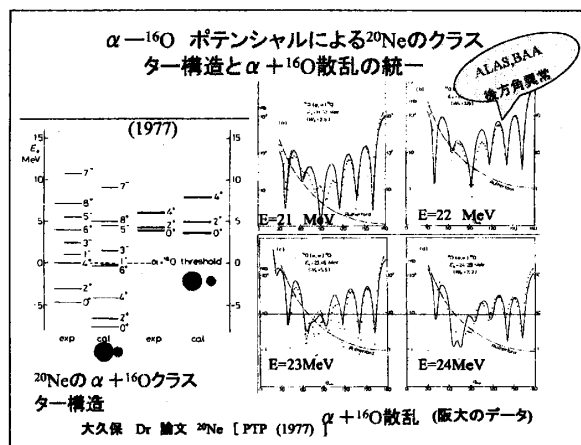
[Slide 9]

を飲みながら研究上の議論を気楽な気持ちで行います。パイエルスなど退官した研究者もティータイムには見えていました。イギリスで驚いたのはクラスターの議論をするときでも核力とかパウリ原理を全然気にせず自由に議論できることです。イギリス人がクラスター研究において必ずしも微視的な見方を好まず、現象を説明するもっとも経済的なシンプルな見方を好むということをなんとなく感じていましたが、議論を通じてイギリスの経験主義を実感しました。イギリス人が日本の微視的クラスター模型研究の論文をあまり引用しがないのもなんとなくわかるような気もしました。微視的クラスター模型による研究は正統的で強力であり平時はいいのですが、未開の荒野に立ち向かうにはイギリス人のような経験主義的な見方も重要だと感じました。京都グループの核力から核構造へというスローガンから解放され、研究とは自由に発想してよいのだと気づき目から鱗がとれるような思いでした。農耕民族と狩猟民族の違いをはだで感じました。核力からの呪縛から解放され、私はまったく異なる核融合の研究をはじめ、このなかで懸案の ^{44}Ti の問題を解く重要なかぎをにぎることができました。イギリスをはなれベルギーに1ヶ月滞在中に共同研究者の協力を得、さらに発展させ最終的にこの問題を解決し、 ^{44}Ti でクラスター構造が成立するとの統一的視点をだすことができました。そこにいたるには超えなければならないいくつもの困難がありました。50年間も解けなかった基本的課題に挑むには新しいパラダイムが必要でした。それは私の1977年の博士論文でだされていた統一的な視点です(slide9)。散乱とクラスター構造の統一という新しいパラダイムです。虹現象もクラスター構造を作る同じ相互作用が起す現象です。よく考えてみるとこれは $\alpha + ^{16}\text{O}$ 系ですすでに成功しているのです。

(1) $\alpha - ^{16}\text{O}$ ポテンシャルによる ^{20}Ne のクラスター構造と $\alpha + ^{16}\text{O}$ 散乱の統一

$\alpha - ^{16}\text{O}$ ポテンシャルで ^{20}Ne のクラスター構造をもつ $K=0^+$, $K=0^-$ バンドがきれいにできます。クラスター構造が存在すれば15MeV付近の高い励起エネルギー領域にそれに関連した散乱現象が見えるのではないかと。このエネルギー領域において α 散乱の角分布が後方角で異常に上昇し、特徴的な振動模様を示す現象、Backward Angle Anomaly (BAA) または Anomalous Large Angle Scattering (ALAS) が知られていました。しかし、その原因はよくわかっていませんでした。

この軽い領域では光学ポテンシャル模型が使えらることは当時一般的に考えられていませんでした。私は1974年、この後方角異常が高い励起状態におけるクラスターの存在によるのではないかと



[Slide 10]

考えました。高い励起エネルギーにおいてはクラスター状態がたとえ存在するとしても崩壊幅が数MeVと大きくなり、エネルギー準位としては見えなくなると思われました。

低いエネルギー領域でのクラスター構造を再現する相互作用を散乱に適用すると吸収ポテンシャルを現象論的に導入することで図(slide10)のように後方異常の散乱の角分布をよく再現できました。S行列の分析からこの特徴的な後方角の上昇は $\alpha + ^{16}\text{O}$ クラスター構造をもつ相対運動が励起した高次節帯の 6^+ , 8^+ により生じていることがわかりました。こうして、束縛状態を含む低い励起エネルギーのクラスター構造と散乱現象が同じポテンシャルで統一的に記述できることが示されました。これが私の博士論文にしるされた着想であり、 ^{44}Ti へ進む考えのプロトタイプは基本的にここにでていました。

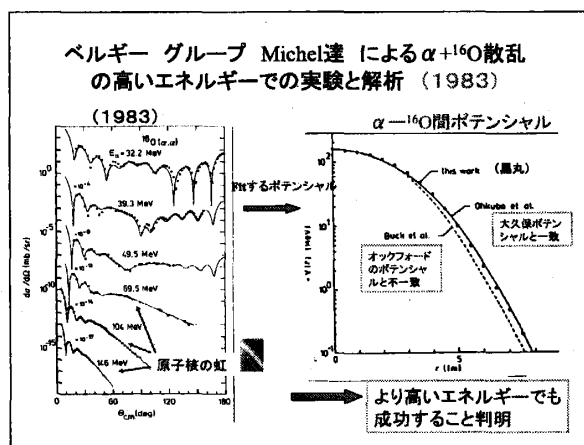
(2) ベルギーのグループによる実験と解析

1983年ベルギーのグループはより高いエネルギーで $\alpha + ^{16}\text{O}$ 散乱の実験を行い、現象論的ポテンシャルで解析を行いました。得られたポテンシャルは図(slide11)のように私のポテンシャルとピッタリと合うものでした。

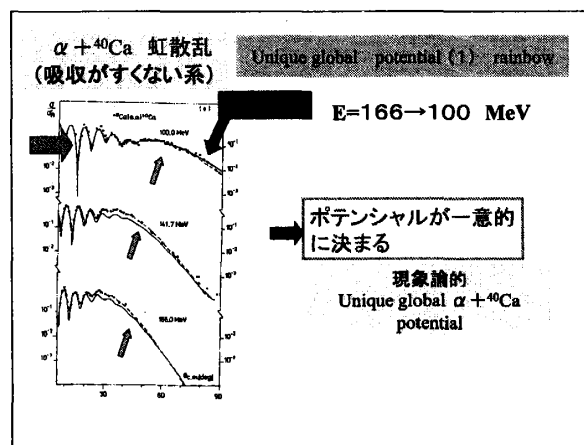
(3) $\alpha + ^{40}\text{Ca}$ の虹散乱

この散乱と構造の統一的記述という考えを $\alpha + ^{40}\text{Ca}$ に適用します。 $\alpha + ^{40}\text{Ca}$ 散乱は低いエネルギーから高いエネルギーまで実験データが豊富に測られています。高いエネルギーの虹散乱から低いエネルギーへ分析をすすめます。166 - 100 MeV 付近の虹散乱の解析から光学ポテンシャルは一意

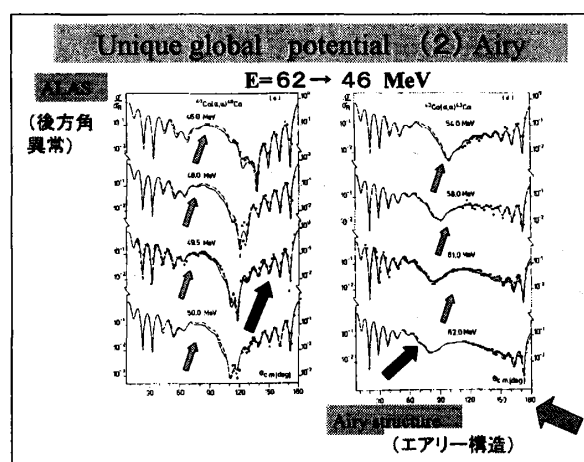
的にあいまいさなく決められます。



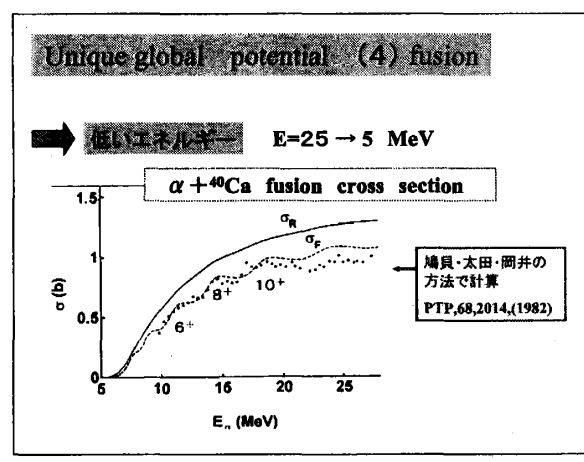
[Slide 11]



[Slide 12]



[Slide 13]



[Slide 14]

図 (slide12) のように入射エネルギー E=100MeV 付近の散乱を記述するポテンシャルは slide13 にみられるように E=62 以下の低いエネルギー領域のエアリー構造, 後方角異常 (ALAS, BAA) をよく記述することができます. E=25 - 5 MeV の低いエネルギー領域では複合核反応が主になるので弾性散乱よりむしろ吸収断面積つまり融合反応を見たほうがより特徴が鮮明になります。

図 (slide14) のように, このポテンシャルで計算された $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ の融合断面積は実験の特徴的な振動模様をよく説明します. これらの振動のピークは $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ クラスター構造をもつ 6⁺, 8⁺, 10⁺ のポテンシャル共鳴から生じていることがわかりました. イギリス滞在中行っていた核融合研究がいきなりのです。

(4) $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ の束縛状態, ${}^{44}\text{Ti}$ のクラスター構造と虹散乱

この相互作用ポテンシャルをもちいて共鳴状態, 束縛状態のエネルギー準位を計算したところ図のような結果が得られました (slide15).

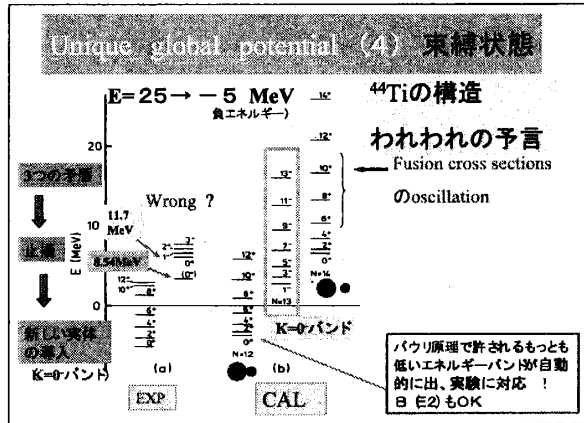
(1) パウリ原理を満たし許されるもっとも低い $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ クラスター構造をもつ N=12 のバンド状態が閾値の下に現れ, 実験の ${}^{44}\text{Ti}$ の基底バンドによく対応する。

(2) 基底バンド状態間の遷移確率 B(E2) を計算すると実験データとよく合う。

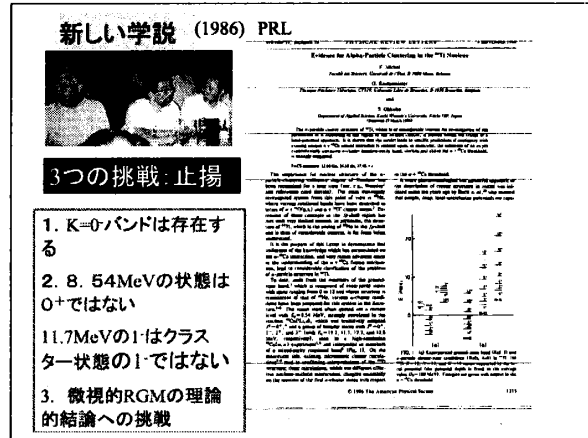
(3) よく発達した $\alpha + {}^{40}\text{Ca}$ クラスター構造をもつ N=14 のバンドの 6⁺, 8⁺, 10⁺ は核融合断面積の振動を説明した状態である。

しかし, ${}^{44}\text{Ti}$ の構造については多くの人が遭遇した深刻な問題がありました. すなわち計算では N=13 の負パリティ・バンドが現れ, 肝心の実験で見つかっているクラスター状態とはまったく対応しません. たいへん困ったが, 同じ相互作用ポテンシャルが N=12 の基底バンドだけでなく N=14 のバンドも実験をよく再現しているし, さらにそれより高いエネルギーの散乱もすべてよく実験を説明してい

ることは重要です。ずんぶん悩み考えましたが、先人の説や実験データよりも自分の理論の方が論理的に一貫しているので、それを信じることにしました。迷いはありませんでした。そして、新しい学説を Phys. Rev. Lett. に投稿しました。



[Slide 15]



[Slide 16]

(5) Phys. Rev. Lett の論文：3つの挑戦

清水の舞台から3回飛び降りるような決断でありましたが、自信はありました。30歳代でまだ若かったのでしょう。

3つの挑戦はつぎのようです。

- (1) 実験で見つからないクラスター状態の $K=0^-$ バンドが今までの実験に反してであると主張すること。
- (2) 8.54MeVの 0^+ 状態のスピンの 0^+ でないのではないかということ（ロチェスターの実験グループへの挑戦）。11.7MeVの 1^- がクラスター状態の 1^- でないという、ミュンスターの実験グループへの挑戦。
- (3) 微視的 RGM+WKB 計算が否定した ^{44}Ti の基底バンドはクラスター模型では記述できないという理論への挑戦。

この論文の内容を話したとき、 $K=0^-$ バンドなど今までのきちんとした実験で見つからないので、なくあるはずがなく、あれば革命だといった人もいました。

6 新しいパラダイムによる理論的予言と実験的検証

(1) 山屋さんからの手紙

多くの実験家に実験で $K=0^-$ バンドを見つけるよう頼みましたが、どうせ実験家は再実験などしたくないだろうし、理論家の話などは信じないだろう、とあきらめていました。1987年の6月東北大学の山屋亮さんから突然手紙がきました (slide17)。実験家としてはあなたの新理論よりもすでにだされている実験データの方を信じるけれども、クラスターの研究にとっては決着をつけるべき重要な問題であるから、再実験を考えてみるということにした、という手紙で、実験をやってくれる人がいるかと正直たいへん驚きました。

(2) 孤独と励まし

既存の考えを根底からぶちこわす考えをだすことはたいへん勇気がいります。研究者も生身の人間でありせまい国ではとかく孤立を強いられすみにくい。そんななかでも励まして下さる方もありました。とりわけ北大の田中一先生はずっと哲学的に励ましてくださいました。自然には不自然はなく、クラスターは深く広いと。またイギリス・オックスフォード大のピーター・ホジソン博士も終始励ましてくれ、高知までわざわざ来てくださいました。彼の哲学は一貫しており、殻模型は核子についてだが、それが α 粒子にかわったのがクラスター模型であり、殻模型と同様全原子核で成立するはずである、という考えです。そのほかにも関心をもち励まして下さる方もあり、たいへんうれしかった。新説に理論的な確信はありましたが、どのようにしてそう確信するにいたったか、それまでのクラスター研究の発展段階を総括し、方法論的にも新説が道理のあるものであることを示すため、「原子核の分子的構造—fp 領域への展開と武谷三段階論」という通常の学術論文とはやや毛色のかわった論文を「素粒子論

研究」に書きました。

実験家 山屋さんからの手紙 1987.6.10

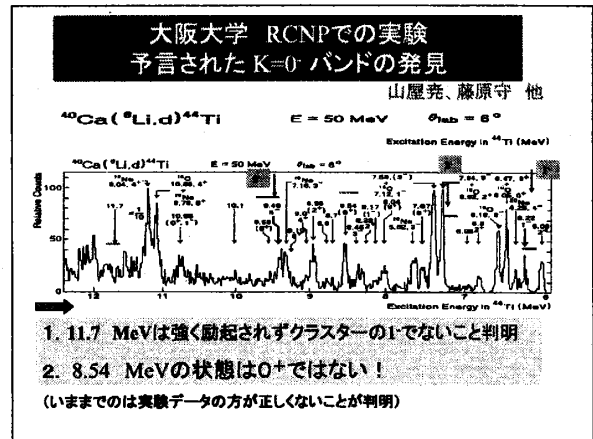
太田保様
貴君の命を賭けた $^{40}\text{Ca} + ^{44}\text{Ti}$ はシボ
シボ4後、RCNPの藤原氏と話をしまして
検討する事になりました。しかし全くdataが
足りなくてとてをさうです。dataを検討する
には要があると見えます。実行するにたす、次回
のMedium time (11A ~ '88/3A)の期間?

$^{40}\text{Ca} (^{44}\text{Ti}, d) ^{44}\text{Ti}$ 反応では、energyは23.90 MeV
位がよいと見えます。新しい情報がありました
ら知らせて下さい。

June 10 1987

山屋

[Slide 17]



[Slide 18]

(3) RCNP での実験と ^{44}Ti の $K=0^-$ バンドのスペクトル

1988 年から実験が大阪大学核物理研究センター (RCNP) の AVF サイクロトロンと高精度スペクトログラフ「雷電」をもちいて始まりました。私も実験メンバーに加わり、成功を祈願して地酒を持参し奉り、サイクロトロン制御室で実験のモニターを眺めていました。1989 年夏までには理論で予言された通りつぎの結果が得られました (slide18)。

(1) クラスター構造をもつ 1^- , 3^- , 5^- 状態が見つかりました。

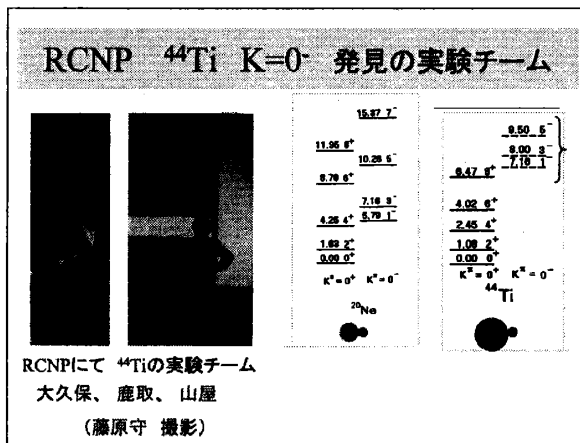
(2) 8.54 MeV の状態も 0^+ でないことが判明しました。スピンは特定できませんでしたが 0^- ではないことははっきりしました。

(3) 11.7 MeV の状態は 1^- であることは間違いなが、クラスター状態の 1^- でないことが判明しました。

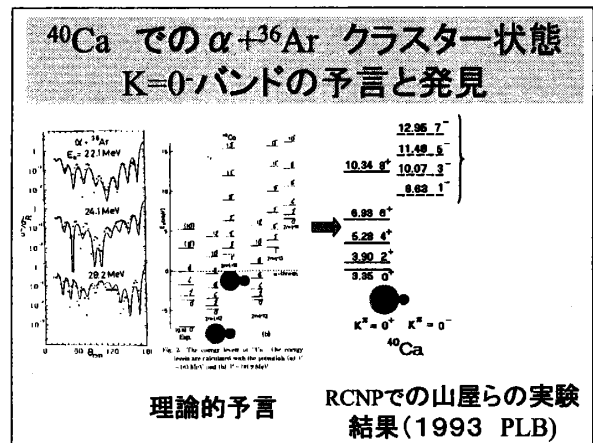
こうして、われわれの新しい理論、クラスター描像が正しいことが実験的に確認されました [7]。図 (slide19) に実験チームと ^{44}Ti のクラスターバンドの結果が ^{20}Ne と比較して示されています。

(4) ^{40}Ca での $K=0^-$ バンドの予言と発見

^{40}Ca についても散乱と構造の統一的記述から $K=0^-$ バンドのクラスター状態の存在が予言され、RCNP で山屋さんによる実験で発見されました [8] (slide 20)。



[Slide 19]



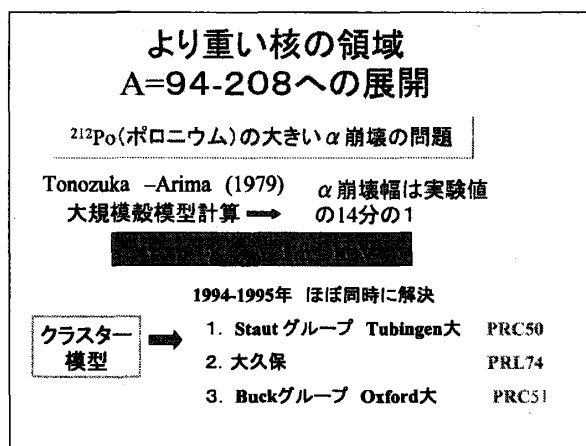
[Slide 20]

こうして、典型核 ^{44}Ti , ^{40}Ca においてクラスター構造が存在し、クラスター模型の視点が成立することが理論的・実験的に明らかにされ、スピン-軌道力の強い重い核におけるクラスター構造研究の道が切り開かれました。質量数 40 以上の重い核の領域は「不毛の砂漠」ではなく、クラスター構造が美しく存在することが示されました。(この ^{44}Ti のクラスター構造の新理論による予言と実験的検証については解説書・読み物として参考文献 [9-19] があります。)

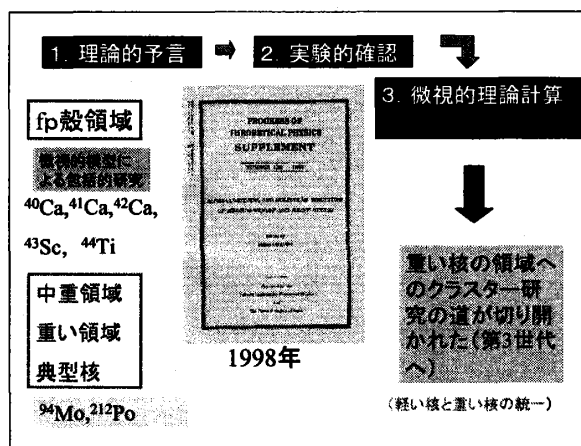
7 より重い核への展開

スピン-軌道力が強い典型核でクラスター構造の視点が成立することが示されると、あとは理論的・実験的に系統的な地道な研究を行うことにより、これらの領域のクラスターの様相が解明されるであろうことは論理的に自明であります。しかし、可能ならば、もっと重い質量数 $A=100$ あるいは $A=200$ あたりの原子核においてもクラスター模型が成立するかを具体的に示すことも意味があります。 ^{44}Ti 領域でクラスター構造の成立が明らかになってから、質量数 200 領域の典型核 ^{212}Po が最大の焦点となりました。日本のほか、ヨーロッパのオックスフォード大グループ、ドイツのチュービンゲン大グループ、ハンガリーのデブレチェンのグループなどが 1990 年代の前半精力的に取り組みデッドヒートの競争がくりひろげられました。

^{212}Po については基底状態の α 崩壊幅がたいへん大きく、殻模型計算では実験値よりきわめて小さい値しかだせないことが長い間知られていました。殿塚・有馬のもっとも大規模な殻模型計算でも実験値の 14 分の 1 しかだせませんでした。この領域ではクラスター模型が成立するとは誰も考えませんから、ずっと殻模型を中心とする計算がされてきました。しかし、われわれの虹散乱と構造の統一的記述という視点からは大きい α 崩壊幅も基底状態が α クラスターの構造をもつとすれば困難なく説明できます。1995 年春までに ^{212}Po の大きい α 幅はクラスター模型で理解できるという共通の認識がイギリス、ドイツ、日本のグループで確認されました [20-22](slide21)。



[Slide 21]



[Slide 22]

8 より重い核への展開の成果のまとめ

^{44}Ti 領域でのクラスター模型の成功はその後の重い領域へのクラスター研究を切り開くものとなりました。 ^{44}Ti の長年の謎は重い領域のクラスター構造研究への道を切り開くための「ロゼッタ・ストーン」[23] でした。私たちの行った ^{44}Ti 領域におけるクラスター研究の成果である (1) クラスター構造の存在の理論的予言, (2) 実験的検証, (3) 核力 + パウリ原理による微視的クラスター模型による包括的な構造理解, の 3 点セットおよび ^{94}Mo 領域, ^{212}Po 領域へのクラスター研究の展開が Progress of Theoretical Physics のサプリメント No.132 [23] にまとめられています (slide22)。

池田さんたちが質量数 20 付近までの軽い領域で Progress of Theoretical Physics のサプリメント No.68 を 1980 年にまとめてから 18 年, ヴェッフェルマイヤーの 1937 年の α 粒子模型から 60 年, クラスター模型が重い核の典型核で成立することが理論的・実験的にこのサプリメント No.132 で示され、重い領域へのクラスター研究の道が切り開かれました。

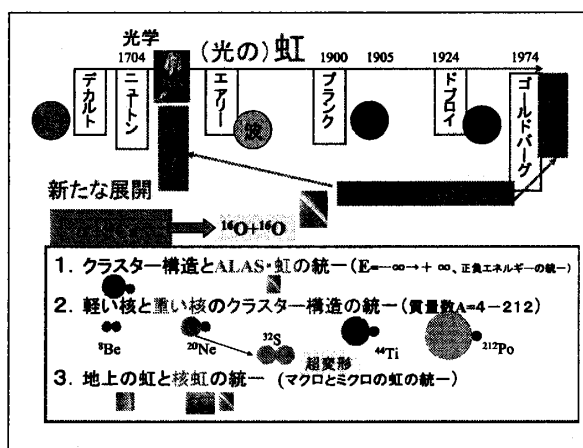
^{44}Ti 領域でクラスター構造の視点が成立することが示されて以降、重い領域のクラスター構造研究は大きく進みました。オックスフォード大学の Buck のグループは系統的研究でアクチノイド領域およびランタノイド領域の α 崩壊およびエネルギー準位・電磁氣的遷移確率の現象論的研究からクラス

ター模型が広範な領域において有効であることを示しました [24]. また、ドイツ・ギーゼン大 Scheid およびロシア・ドブナの Jolos のグループ [25] も重い領域の超変形・パリティ 2 重項とクラスター構造の研究を展開しています. 重い領域の核で広範にみられる反転非対称状態と 3 次変形・クラスター構造の研究も行われるようになっていきます [26]. クラスター模型もその有効性がさらに深く広く確立されるためには殻模型やボーアの集団運動模型がそうであったように、個別的な地道な理論的・実験的研究の積み重ねが必要であることはいうまでもありません.

9 その後の発展：原子核の虹、ニュートンのゼロ次の虹

重い領域における原子核のクラスター構造の突破口となった原子核の虹とクラスター構造の統一という視点は $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 散乱に見られる虹散乱の理解にも大きく寄与することができました [27]. $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ の虹散乱を通じて $^{16}\text{O}-^{16}\text{O}$ 間の相互作用がかなり正確に決まりました. この系についても約 30 年解けなかった ^{32}S における $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ クラスター構造の存在が虹とクラスター構造の統一の視点から新しい実体の導入で矛盾なく理解できることが示されました [28]. 重い系においてはクラスター状態のフラグメンテーションが重要になります. この認識は ^{44}Ti のクラスター構造の研究を通じて明らかになった、軽い核ではみられなかった、クラスター構造の存在様式に関するたいへん重要な知見です. こうして、 α クラスターから ^{16}O クラスターが理解できる道が開かれました. さらに、 $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ クラスター構造の存在は $\alpha + \alpha$ 系の類似構造が存在するというだけでなく、重い領域において広く見られる超変形した原子核とクラスター構造の関係をつなぐ道を切り開くものとなりました [29]. 超変形がクラスタリングによりひきおこされるという考えはたいへん有望で面白い考えだと思われます. ごく最近、 α クラスターがポーズ・アインシュタイン凝縮をおこして希薄なガス状になっておれば原子核の虹の高さと縞模様に変化を生じ、実験的に観察できることを指摘しました [30]. 近く、ロシアのグループが「The rainbow project」をたちあげ系統的な実験を始めるそうです.

原子核の虹と気象虹との比較する研究を行い、原子核の虹はいわゆるニュートンのゼロ次の虹であることそして低いエネルギーで見えるいわゆる原子核のエアーリー構造は正確には虹ではなくプレ虹と呼ばれるべきであることを指摘しました [31]. ニュートンがその著書「光学」で執着し、その存在を信じて疑わなかった一度も反射をとまなわない虹は、ニュートンの信じたように存在することがわかりました. こうして、空の虹と極微の原子核の虹が統一的に理解できるようになりました. 原子核のクラスターの研究は原子核構造にとどまらず、ニュートンが約 300 年前に考えた光の虹の理解をも深めることができました (slide23).



[Slide 23]

謝辞

1. 故 小林稔 (京都大)
2. 故 永田忍 (京都大、宮崎大)
3. 故 坂東弘治 (京都大、福井大、核研)

共同研究者

1. 故 G.Reidemeister (Brussels), F.Michel (Mons) (Ti領域への展開)
2. 故 山屋亮 (東北大)、藤原守 (RCNP) 他 実験
3. 作田俊美 (宮崎大) 微視的クラスター模型計算

[Slide 24]

10 結論

ヨーロッパのコペンハーゲンを中心に展開されたボーア・モッテルソンの集団運動模型、アメリカのマイヤー、ヨーロッパのイェンセンによる殻模型. 極東の辺境の地、北海道大学で田中一先生たちによりはじめられた動力学的クラスター模型研究は軽い核で成功するだけでなく、スピン-軌道力の強い重い核の領域でも成立することが示され、原子核における普遍的模型でありうることを示されました. 殻模型、集団運動模型が美しいのはすべての領域で成立するからです. クラスター模型も 1937 年から 50 年後、1986 年、同様でありうることを示されました. この 3 つの模型が同じエネルギー

領域で成立する原子核とはそれにしても不思議な多体系であるといわざるを得ません。この3つの模型が統一されるのはいつの日のことであろうか。クラスター研究をリードしてきた日本の研究者が大きな役割を果たすことを期待したい。

11 謝辞

この研究を通じて、小林研の自由な雰囲気の研究できたことおよびこの間この研究に興味を示され終始励ましていただいた小林稔先生、永田忍先生、坂東弘治先生にたいし感謝します。また F. Michel, 山屋堯, 作田俊美さんをはじめとする共同研究者およびこの間激励くださった多くの方に感謝します。この研究を終始サポートしていただいた京都大学基礎物理学研究所および大阪大学核物理研究センターにも感謝します。

参考文献 (専門分野以外のかたにも読めるよう解説的なものをおもにあげます。)

1. W. Wefelmeier, Z. Phys. 107, 332 (1937).
2. M. Blatt and V. F. Weisskopf, Theoretical Nuclear Physics (John Wiley & Sons Inc, 1952).
3. I. Shimodaya, R. Tamagaki, and H. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 27, 793 (1962).
4. Prog. Theor. Phys. Suppl. 52 (1972).
5. Prog. Theor. Phys. Suppl. 68 (1980).
6. F. Michel, G. Reidemeister, and S. Ohkubo, Phys. Rev. Lett. 57, 1215 (1986).
7. T. Yamaya, S. Oh-ami, M. Fujiwara, T. Itahashi, K. Katori, M. Tosaki, S. Kato, S. Hatori, and S. Ohkubo, Phys. Rev. C 42, 1935 (1990); T. Yamaya, S. Oh-ami, O. Satoh, M. Fujiwara, T. Itahashi, K. Katori, S. Kato, M. Tosaki, S. Hatori, and S. Ohkubo, Phys. Rev. C 41, 2421 (1990).
8. S. Ohkubo and K. Umehara, Prog. Theor. Phys. 80, 598 (1988); T. Yamaya, M. Saito, M. Fujiwara, T. Itahashi, K. Katori, T. Suehiro, S. Kato, S. Hatori, and S. Ohkubo, Phys. Lett. B306, 1 (1993).
9. 大久保茂男, 昭和62年度—平成元年度文部省科学研究費補助金一般研究C研究成果報告書「 ^{44}Ti 領域における原子核の分子的構造の研究」(1990.3)p.1-109.
10. 大久保茂男, 科学研究費一般研究C研究成果報告書(1991-1993)「fp 殻における α 的4 体相関と原子核の分子的構造」(1994 年10 月) p.1-146.
11. 大久保茂男, 文部省科学研究費補助金(基盤C (2) 研究成果報告書(1996-1998)「重い領域の原子核における分子的構造の研究」(2000 年1 月) p.1-49.
12. 大久保茂男, 科学研究費補助金研究成果報告書(平成12 年度—平成15 年度)「中重核領域における α —核相互作用とクラスター構造」(2004 年10 月) p.1-92.
13. 大久保茂男, 「アルファ・クラスターの夢を実証へ—山屋さんとの実験・理論の信頼の二人三脚—」山屋博士追悼文集(1998 年4 月, 山屋博士追悼文刊行会, 東北大学理学部)p.3-18.
14. 大久保茂男, 「原子核の α 粒子模型」パリティ 第5 巻, 4 号, 48 (1990 年4 月号).
15. 大久保茂男, 「原子核の分子的構造: ^{44}Ti 領域への展開」日本物理学会誌 45 巻, 648 (1990).
16. 山屋堯, 「原子核のクラスター構造とアルファ粒子移行反応: fp 殻領域での α クラスター構造の観測」日本物理学会誌 46 巻, 585 (1992).
17. 大久保茂男, 「原子核の分子的構造—fp 領域への展開と武谷三段階論」素粒子論研究 76, 137 (1988).
18. 大久保茂男, 「原子核物理の将来—核理論の課題—(各論シリーズ 第11 回) 原子核のクラスター構造—fp 殻領域を中心に—」素粒子論研究 85, 423 (1992).
19. S. Ohkubo, T. Yamaya, and P. E. Hodgson, Nuclear Clusters, Oxford Studies in Nuclear Physics No.22, edited by H. Ejiri and H. Toki Nucleon-hadron many body system (1999, Oxford University Press) p.150-189.
20. F. Hoyler, P. Mohr, and G. Staudt, Phys. Rev. C 50, 2631 (1994).
21. S. Ohkubo, Phys. Rev. Lett. 74, 2176 (1995).
22. B. Buck, A. C. Merchant, and S. M. Perez, Phys. Rev. C 51, 559 (1995); B. Buck, J. C. Johnston, A. C. Merchant, and S. M. Perez, Phys. Rev. C 53, 2841 (1996).
23. Prog. Theor. Phys. Suppl. No.132 (1998) Ed. S. Ohkubo, Alpha-clustering and Molecular Structure of Medium-weight and Heavy Nuclei.
24. B. Buck, A. C. Merchant, and S. M. Perez, Phys. Rev. C 71, 014311 (2005).
25. G. G. Adamian, N. V. Antonenko, R. V. Jolos, Yu. V. Palchikov, and W. Scheid, Phys. Rev. C 67, 054303 (2003); T. M. Shneidman, G. G. Adamian, N. V. Antonenko, R. V. Jolos, and W. Scheid, Phys. Rev. C 67, 014313 (2003).
26. P. A. Butler and W. Nazarewicz, Rev. Mod. Phys. 68, 349 (1996).
27. F. Michel, F. Brau, G. Reidemeister, and S. Ohkubo, Phys. Rev. Lett. 85, 1823 (2000).
28. S. Ohkubo and K. Yamashita, Phys. Rev. C 66, 021301(R) (2002).
29. S. Ohkubo, Proceedings of the Symposium on Nuclear Clusters (2003, EP systema, Debrechen) Eds. R. Jolos and W. Scheid, p.161.
30. S. Ohkubo and Y. Hirabayashi, Phys. Rev. C 70, 041602(R) (2004).
31. F. Michel, G. Reidemeister, and S. Ohkubo, Phys. Rev. Lett. 89, 152701 (2002).

討論

国廣：どうもありがとうございました。

池田：人間の一生は短いです。それで私は、いまのことに特に反論するつもりはないのですけれども、私が終わりと言ったのはその模型が終わりと言っているわけではないのです。終わりまでやり切ることが非常に重要である。それなしには、次の発展というものの、認識の発展はないのだと、これは哲理であります。私が強調したかったのは、シェルモデルが徹底的にいろいろなことをやってくれたからこそ、高い励起情報、低いほうの状態をやったら、そこにある例外的なものをつなぎ合わせると、新しいものの見方ができるんだということを言ったのです。それを発展させるには、やはり重要なことは、課題が設定されるわけではなくて、課題のキーポイントになる流れをつくることのキーポイントは何かということ、われわれは具体的に示さなければいけません。そのときは、ものになるかどうか、わからないわけです。わからないけれども、それがそういうふうを考えられたら、勇敢にそれを出して、それを徹底的に発展させて、研究ですから、誰もがやらないわけですから、徹底的にやって次の認識につなげなさいと。それがやはり基礎物理学というか、われわれのやっていることではないか。その繰り返しです。大久保さんがやられたのは、重い核へ行くところのキーポイントが、1つは先ほどの negative parity にもありますけれども、やはり虹現象、すなわちレインボー散乱で、ポテンシャルというものを抽出できるんだということの、やはり、そのところがキーポイントになって、次へ発展するポイントを見つけれたと。そういう意味で私は、ここにちゃんと書いてありますように、われわれはそういう研究を何度も繰り返したという歴史が、科学の歴史なのだろうと思っております。そういう意味で、あなたの終わりということ。

大久保：あなたの「終わり」は第二世代の終わりで、終わりは第三世代の始まりだということです。

池田：そうです。そういうことだけちょっと。

大久保：ようするに2重性を持っているということですね。

国廣：田中先生、どうでしょうか。よろしいですか。

坂東：辺境の地でクラスターが始まって、また辺境の地で次の世代が始まったということなのでしょうか。そのへんがちょっと、どうして。いろいろと矛盾が出てきて、どれもうまくいかなかったと。それをどこで見つけるかわからないですけれども、そういうところで始まったような、何か、どうなんでしょうか。

大久保：私の場合は、結局、小林研ですから、永田・坂東という核力の偉大な成果があるわけです。Hole line expansion という。

ですから結局、核力とパウリ原理という大きい流れのなかでものごとを考えてきていますから、それは、非常にうまくいくときと、やっぱりそうでないときというのがあって、そこはやっぱり、見極めなければいけないわけです。ただ京都にいれば、やっぱり永田・坂東ラインに入っているわけですから、そこから出てみるというのは難しいわけです。そういう意味では、一步外に出るという意味では、私は高知で流行に乗らずに考えていましたし、この虹を考えても、ちょうど外国にいたときに精神的に自由になって、核力から核構造というのは、非常に大事なんだけど、つねに正攻法ではものが突破できるとは限らない。これは核力の、武谷三段階論でもそうだったと思います。

だからやっぱり、そのところをよく見極めるということが大事ではないか。ですから、非常に大きい流れのときには、核力と核構造、パウリ原理というのは非常にパワフルですけども、大きい壁を乗り越えるときには、核力からだけでは原子核は理解できるとは限りません。それは池田先生が言われたように、シェルモデルとか、ボアーのコレクティブモデル、核力と関係なく出てきているわけですから。ですから辺境の地というのは重要だと思います。

池田：ひと言だけ。先ほど言ったんですけれども、私も新潟の地で十何年いました。それはそこがそういうことを許してくれるのです。大きい大学、東大も行ってきましたけれども、東京大学にいたときは、やっぱり大学が忙しいのです。毎年やっぱり変わったテーマをつくらなければいけないのです。それもドクターの学生ですから、一人ひとり、新しい課題を考えなければいけないのです。それが1つ。

私ができたもう1つの理由は、じゃあ、田舎に行ったらそれができるかということ、そうでもありません。ようするに、それをつなぐ場所が必要なのです。おかげさまで私は、新潟に行く前に、京都大学と東京大学と日本大学に行きまして、東京の人と全国的な人とのつながりがで

きて、基研、核物理研究センター、それから理化学研究所、高エ研、それからもう1つ大きい、原子核研究所を、別の言い方をすれば、フルに活用させていただきました。その2つがあって、初めてできるのではないかと私は思っております。

大久保：私の場合もサプルメントで書きましたように、基研の研究会をその前に何回もやっていますから、基研でプロジェクトを認めていただいて、重い核でクラスターがいけるということを認めていただいてやっていますから、やっぱり基研の存在というのは、非常に大きいと思います。

杉本[△]：辺境の話ですが、例えば東京のなかにも、辺境の地があるというお話を。私は杉本と申しまして、天体物理、天文学です。

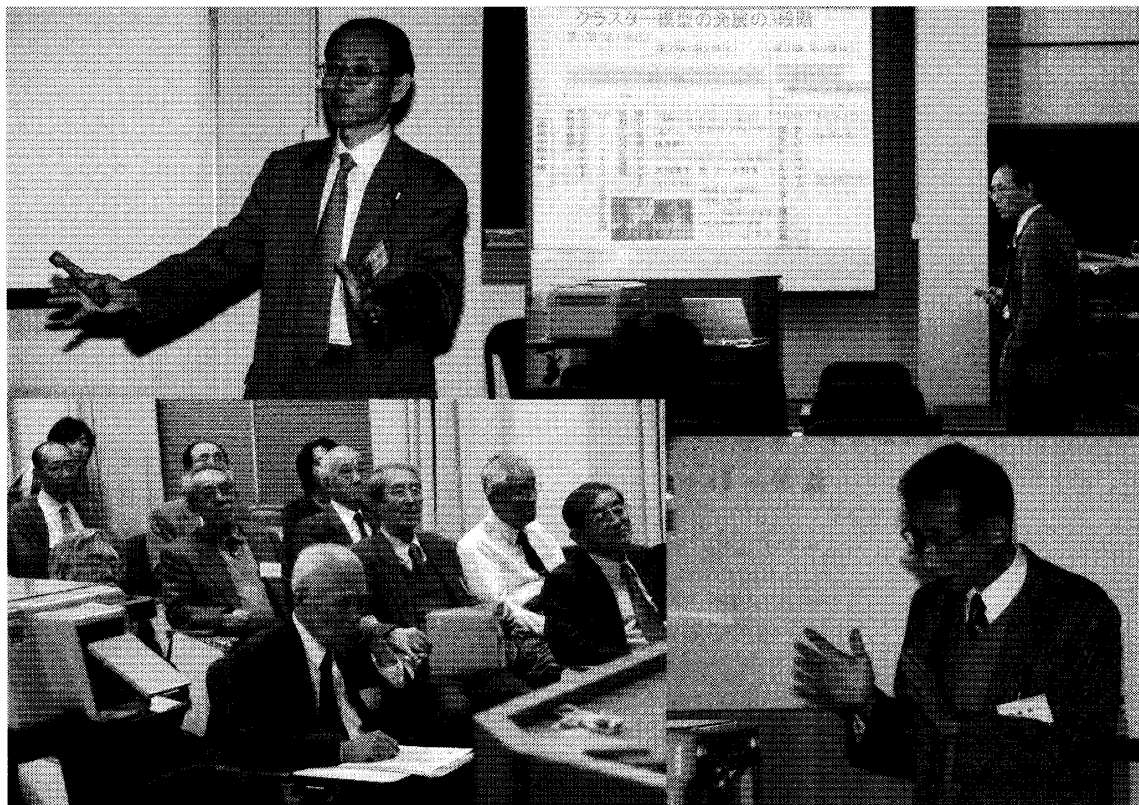
実は駒場という辺境の地におりまして、結局、何ができたかという、私は1996年ごろには、世界最高速の専用計算機を使った多体問題をやっていたのです。それはその後、べつに天体の多体問題だけでなく、タンパク質のMDとか、そんなものにも使われています。それはいま世界最高速の計算機で、地球シミュレーターよりも速いのです。

そういうことを始めましたときに、みんなが言ったのは、杉本さんはそんなあほな計算機づくりなんかせずに、もうちょっと天文学をやったほうが、世の中のために役に立つから、そんなものはやめろと、いうことでした。

もし私が本郷の天文学教室に居たら、やめさせられていたところですが、駒場という辺境の地で、総合文化研究科の広域科学科というところにいたからできたのです。

そういう意味で、いまの場合は、その両方の条件を満たしていました。東京に近いですから、いろいろなところにも行けます。辺境といってもメンタルに遠ければいいので、configuration space で遠いという必要は必ずしもないという話です。

国廣：どうもありがとうございました。面白い話になってきているのですが、残念ながら時間のほうが押しています。だいたいいろいろな、基研にとってもうれしい話に展開してきているように思いますが、すみません。どうもありがとうございました。



ph02

大久保、林、杉本[△]、益川、南部、川崎、大貫、中西、丹生、矢崎